(19)日本国特許庁(JP)
(12)**公表特許公報(A)**
(11)特許出願公表番号
特表2004-503800
(P2004-503800A)
(43)公表日 **平成16年2月5日(2004.2.5)**

(51)Int.Cl.^{7}	F I		テーマコード(参考)
G02B 6/122	G02B 6/12	A	2H047

審査請求 有 予備審査請求 有 (全 36 頁)

(21)出願番号	特願2002-509812(P2002-509812)
(86)(22)出願日	平成13年6月26日(2001.6.26)
(85)翻訳文提出日	平成15年1月10日(2003.1.10)
(86)国際出願番号	PCT/US2001/041142
(87)国際公開番号	WO2002/005000
(87)国際公開日	平成14年1月17日(2002.1.17)
(31)優先権主張番号	60/217,168
(32)優先日	平成12年7月10日(2000.7.10)
(33)優先権主張国	米国(US)
(31)優先権主張番号	09/841,464
(32)優先日	平成13年4月24日(2001.4.24)
(33)優先権主張国	米国(US)
(81)指定国	EP(AT,BE,CH,CY,DE,DK,ES,FI,FR,GB,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PT,SE,TR),CA,JP,KR

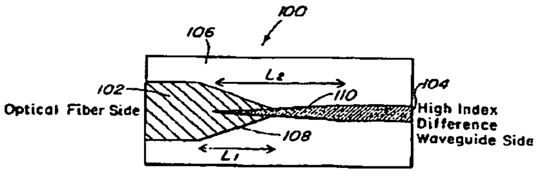
(71)出願人 596045948
マサチューセッツ インスティテュート オブ テクノロジー
Massachusetts Institute of Technology
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 ケンブリッジ、マサチューセッツ アベニュー 77
(74)代理人 100075258
弁理士 吉田 研二
(74)代理人 100096976
弁理士 石田 純

最終頁に続く

(54)【発明の名称】低インデックス差導波路と高インデックス差導波路との間に設けられるモード変成器

(57)【要約】

相異なるインデックス差を有する２本の導波路に係わる光モードの間を低損失で結合可能なモード変成器（１００）が提供される。モードのサイズと実効インデックスが、２本の導波路の間で徐々に変わるので、モード形状、サイズ、速度が徐々に変成され、パワー損失は最小限に抑えられる。本モード変成器は、低インデックス差を有する光ファイバ導波路のモードを平面高インデックス差導波路のモードに結合するのに有用である。結合は双方向に行える。



【特許請求の範囲】

【請求項１】

誘電体導波路光モード変成器であって、

第１テーパ領域を有する第１コアと、これを囲むクラッドとを備える第１誘電体チャネル型導波路と、

第２テーパ領域を有する第２コアと、これを囲む前記クラッドとを備える第２誘電性チャネル型導波路とを備え、

前記第２テーパ領域の一部が前記第１テーパ領域内に埋め込まれ、埋め込まれた長さがゼロ以上であり、

前記第２テーパ領域の埋め込まれた部分が、前記モード変成方向に直角な断面において前記第１テーパ領域で完全に囲まれており、

前記第１と第２テーパ領域が接触しているとき、前記第１テーパ領域内に埋め込まれた前記第２テーパ領域の前記埋め込まれた長さがゼロであることを特徴とする誘電体光導波路モード変成器。

【請求項２】

請求項１記載の変成器において、前記クラッドが、前記第１と第２コアの屈折率とは相異なる屈折率を有する一種または複数種の材料で構成されていることを特徴とする変成器。

【請求項３】

請求項１記載の変成器において、前記第１コアの屈折率が、前記直角方向に傾斜（ｇｒａｄｅｄ）していることを特徴とする変成器。

【請求項４】

請求項１記載の変成器において、前記第２コアの屈折率が、前記直角方向に傾斜していることを特徴とする変成器。

【請求項５】

請求項１記載の変成器において、前記クラッドの屈折率が、前記直角方向に傾斜していることを特徴とする変成器。

【請求項６】

請求項１記載の変成器において、屈折率が、前記直角方向において前記第１コアから前記クラッドに向かって徐々に変化していることを特徴とする変成器。

【請求項７】

請求項１記載の変成器において、屈折率が、前記直角方向において前記第２コアから前記クラッドに向かって徐々に変化していることを特徴とする変成器。

【請求項８】

請求項１記載の変成器において、屈折率が、前記直角方向において前記第１コアから前記クラッドに向かって急激に変化していることを特徴とする変成器。

【請求項９】

請求項１記載の変成器において、屈折率が、前記直角方向において前記第２コアから前記クラッドに向かって急激に変化していることを特徴とする変成器。

【請求項１０】

請求項１記載の変成器において、前記第１テーパ領域と前記第２テーパ領域との間の光伝送効率が０．１％以上の場合は、前記第１テーパ領域と第２テーパ領域の両先端が接触しているとされることを特徴とする変成器。

【請求項１１】

請求項１記載の変成器において、前記第１と第２のコア、および前記クラッドが、平面光波回路（ＰＬＣ）上に集積化されていることを特徴とする変成器。

【請求項１２】

請求項１記載の変成器において、前記第１コアの屈折率が、前記第２コアの屈折率より比較的低いことを特徴とする変成器。

【請求項１３】

請求項１記載の変成器において、前記第１コアの屈折率が、前記クラッドの屈折率より僅

かに高いことを特徴とする変成器。

【請求項１４】

請求項１３記載の変成器において、n_1が前記第１コアの屈折率で、n_3が前記クラッドの屈折率である場合、$0 < (n_1 - n_3) / n_3 < 0.1$であることを特徴とする変成器。

【請求項１５】

請求項１記載の変成器において、前記第２コアの屈折率が、前記第１コアの屈折率と前記クラッドの屈折率より格段に高いことを特徴とする変成器。

【請求項１６】

請求項１５記載の変成器において、n_1が前記第１コアの屈折率で、n_2が前記第２コアの屈折率で、n_3が前記クラッドの屈折率である場合、$0.3 \leqq (n_2 - n_3) / n_3$であることを特徴とする変成器。

【請求項１７】

請求項１記載の変成器において、伝播する光モードが、前記第１コアと前記第２コアの間を伝播するとき、サイズと形状と速度の変成が行われることを特徴とする変成器。

【請求項１８】

請求項１記載の変成器において、伝播する光モードが、前記第１導波路と前記第２導波路の間を双方性に伝播できることを特徴とする変成器。

【請求項１９】

請求項１記載の変成器において、前記第２テーパ領域により、伝播する光モードに対する実効インデックスが変化することを特徴とする変成器。

【請求項２０】

請求項１記載の変成器において、前記第１テーパ領域により、伝播する光モードの反射が最小限に抑えられ、前記伝播する光モードが前記第２コアに集束されることを特徴とする変成器。

【請求項２１】

請求項１記載の変成器において、前記第１テーパ領域を設けたことにより、伝播する光モードのモード変成効率が向上することを特徴とする変成器。

【請求項２２】

請求項１記載の変成器において、前記第１と第２のテーパ領域が、連続体あるいはセグメント体であることを特徴とする変成器。

【請求項２３】

請求項１記載の変成器において、前記第１と第２のテーパ領域が、リニア体あるいはノンリニア体であることを特徴とする変成器。

【請求項２４】

誘電体導波路光モード変成器であって、
第１テーパ領域を有する第１コアと、これを囲むクラッドとを備える第１誘電性チャネル型導波路と、
第２テーパ領域を有する第２コアと、これを囲む前記クラッドとを備える第２誘電性チャネル型導波路とを備え、
前記第２テーパ領域の一部が前記第１テーパ領域内に埋め込まれ、埋め込まれた長さがゼロ以上であり、
前記第２コアと前記クラッドにより、高インデックス差導波路が形成され、
前記第２テーパ領域の埋め込まれた部分が、前記モード変成器方向に直角な断面において前記第１テーパ領域で完全に囲まれており、
前記第１と第２テーパ領域が接触しているとき、前記第１テーパ領域内に埋め込まれた前記第２テーパ領域の前記埋め込まれた長さがゼロであることを特徴とする誘電体光導波路モード変成器。

【請求項２５】

請求項２４記載の変成器において、前記第１コアの屈折率が、前記第２コアの屈折率より

比較的低いことを特徴とする変成器。

【請求項２６】

請求項２４記載の変成器において、高インデックス差導波路は、導波路のモード・フィールドサイズが、インデックス差０．３以上のチャネル型導波路のサイズからは断面積５０％差以内である導波路として定義されることを特徴とする変成器。

【請求項２７】

請求項２４記載の変成器において、伝播する光モードが、前記第１コアと前記第２コアの間を伝播するとき、サイズと形状と速度の変成が行われることを特徴とする変成器。

【請求項２８】

請求項２４記載の変成器において、伝播する光モードが、前記第１導波路と前記第２導波路の間を双方性に伝播できることを特徴とする変成器。

【請求項２９】

請求項２４記載の変成器において、前記第２テーパ領域により、伝播する光モードに対する実効インデックスが変化することを特徴とする変成器。

【請求項３０】

請求項２４記載の変成器において、前記第１テーパ領域により、伝播する光モードの反射が最小限に抑えられ、前記伝播する光モードが前記第２コアに集束されることを特徴とする変成器。

【請求項３１】

請求項２４記載の変成器において、前記第１テーパ領域を設けたことにより、伝播する光モードのモード変成効率が向上することを特徴とする変成器。

【請求項３２】

請求項２４記載の変成器において、前記第１と第２のテーパ領域が、連続体あるいはセグメント体であることを特徴とする変成器。

【請求項３３】

請求項２４記載の変成器において、前記第１と第２のテーパ領域が、リニア体あるいはノンリニア体であることを特徴とする変成器。

【請求項３４】

請求項２４記載の変成器において、前記第１コアの屈折率が、前記直角方向に傾斜していることを特徴とする変成器。

【請求項３５】

請求項２４記載の変成器において、前記第２コアの屈折率が、前記直角方向に傾斜していることを特徴とする変成器。

【請求項３６】

請求項２４記載の変成器において、前記クラッドの屈折率が、前記直角方向に傾斜していることを特徴とする変成器。

【請求項３７】

請求項２４記載の変成器において、屈折率が、前記直角方向において前記第１コアから前記クラッドに向かって徐々に変化していることを特徴とする変成器。

【請求項３８】

請求項２４記載の変成器において、屈折率が、前記直角方向において前記第２コアから前記クラッドに向かって徐々に変化していることを特徴とする変成器。

【請求項３９】

請求項２４記載の変成器において、屈折率が、前記直角方向において前記第１コアから前記クラッドに向かって急激に変化していることを特徴とする変成器。

【請求項４０】

請求項２４記載の変成器において、屈折率が、前記直角方向において前記第２コアから前記クラッドに向かって急激に変化していることを特徴とする変成器。

【請求項４１】

請求項２４記載の変成器において、前記第１テーパ領域と前記第２テーパ領域との間の光

伝送効率が０．１％以上の場合は、前記第１テーパ領域と第２テーパ領域の両先端が接触しているとされることを特徴とする変成器。

【請求項４２】
請求項２４記載の変成器において、前記第１と第２のコア、および前記クラッドが、平面光波回路（ＰＬＣ）上に集積化されていることを特徴とする変成器。

【請求項４３】
請求項２４記載の変成器において、前記クラッドが、前記第１と第２コアを囲む領域（複数を含む）であって、前記第１と第２コアの実効インデックスより低い実効インデックスを有する領域（複数を含む）として定義されることを特徴とする変成器。

【請求項４４】
請求項２４記載の変成器において、前記クラッドが、前記第１と第２コアを囲む領域（複数を含む）であって、光モードのエバネッセント・フィールドが存在する領域（複数を含む）として定義されることを特徴とする変成器。

【請求項４５】
光モードのカップラであって、
第１テーパ領域を有する第１コアと、
第２テーパ領域を有する第２コアと、
前記第１と第２コアとを囲むクラッドとを備え、
前記第２テーパ領域の一部が前記第１テーパ領域内に埋め込まれ、
前記クラッドが、前記第１と第２コアの屈折率とは相異なる屈折率を有する一種または複数種の材料で構成されていることを特徴とする光モードのカップラ。

【請求項４６】
誘電性導波路光モード変成器であって、
第１テーパ領域を有する第１コアと、これを囲むクラッドとを備える第１誘電性導波路と、
第２テーパ領域を有する第２コアと、これを囲む前記クラッドとを備える第２誘電性導波路とを備え、
前記第２テーパ領域の一部が前記第１テーパ領域内に埋め込まれ、
前記クラッドが、前記第１と第２コアの屈折率とは相異なる屈折率を有する一種または複数種の材料で構成されていることを特徴とする誘電性導波路光モード変成器。

【請求項４７】
光領域の間に伝播する光モードを双方向性に結合する方法であって、
第１テーパ領域を有する第１コアを提供するステップと、
第２テーパ領域を有する第２コアを提供し、前記第２テーパ領域を前記第１テーパ領域に埋め込むステップと、
前記第１と第２コアとを囲むクラッドを提供し、前記クラッドを、前記第１と第２コアの屈折率とは相異なる屈折率を有する一種または複数種の材料で構成するステップと、
伝播する光モードを前記第１または第２コアのいずれかに導入するステップと、
を備えることを特徴とする光領域間伝播光モード双方向性結合方法。

【請求項４８】
伝播する光モードを両光領域の間に双方向性に結合する方法であって、
第１テーパ領域を有する第１コアを提供するステップと、
第２テーパ領域を有する第２コアを提供し、前記第２テーパ領域の一部を前記第１テーパ領域に埋め込むステップと、
前記第１と第２コアとを囲むクラッドを提供し、前記クラッドを、前記第１と第２コアの屈折率とは相異なる屈折率を有する一種または複数種の材料で構成するステップと、
伝播する光モードを前記両光領域のいずれかに導入するステップと、
を備えることを特徴とする伝播光モード両光領域間双方向性結合方法。

【請求項４９】
伝播する光モードを高屈折率領域と低屈折率領域との間で双方向性に結合する方法であっ

て、
第１テーパ領域を有する第１低屈折率コアを提供するステップと、
第２テーパ領域を有する第２高屈折率コアを提供し、前記第２テーパ領域の一部を前記第１テーパ領域に埋め込むステップと、
前記第１と第２コアとを囲むクラッドを提供し、前記クラッドを、前記第１と第２コアの屈折率とは相異なる屈折率を有する一種または複数種の材料で構成するステップと、
伝播する光モードを前記第１または第２コアのいずれかに導入するステップと、
を備えることを特徴とする伝播光モード高屈折率領域／低屈折率領域間双方向性結合方法。

【請求項５０】
伝播する光モードを高屈折率領域と低屈折率領域との間で双方向性に結合する方法であって、
第１テーパ領域を有する第１低屈折率コアを提供するステップと、
第２テーパ領域を有する第２高屈折率コアを提供し、前記第２テーパ領域の一部を前記第１テーパ領域に埋め込むステップと、
前記第１と第２コアとを囲むクラッドを提供し、前記クラッドを、前記第１と第２のコアの屈折率とは相異なる屈折率を有する一種または複数種の材料で構成するステップと、
伝播する光モードを前記高屈折率領域または前記低屈折率領域のいずれかに導入するステップと、
を備えることを特徴とする伝播光モード高屈折率領域／低屈折率領域間双方向性結合方法。

【発明の詳細な説明】

【０００１】
（優先権に関する情報）
本出願は、２０００年７月１０日出願の暫定米国特許出願第６０／２１７，１６８号に基づいて優先権を主張するものであると同時に２００１年４月２４日出願の米国特許出願第０９／８４１，４６４号に係わる一部継続出願である。

【０００２】
（技術分野）
本発明は、光技術の分野、特に、光変成器または２本の導波路の間の光放射を双方向性に結合する変成器に関する。本発明は、２本の導波路の間のモード変成器の分野でもある。

【０００３】
（背景技術）
２本の相異なる導波路の間に設けられるモード変成器は、光コンポーネントの一つから送られる光波（モード）を別の一つの光コンポーネントに結合する光システムの必須の部分である。光通信では、光ファイバ導波路と高インデックス差（コアとクラッドの屈折率の差）平面導波路との間に設けられるモード変成器は、光ファイバ通信に平面光波回路（ＰＬＣ）を成功裡に組み込むのに極めて重要である。従って、２本の導波路の間の効率的なモード変成器の開発は、精力的研究の重要課題であった。

【０００４】
相異なるインデックス（屈折率）差および／またはコア屈折率を有する２本の導波路の間でモードを変成するとき、モードサイズ、形状、モード速度の差に起因して高い結合損失が生じる。例えば、光ファイバ導波路のインデックス差とモードとが、高インデックス差プレーナ型導波路のそれらと相異なる場合は、光ファイバ導波路と高インデックス差プレーナ型導波路とを直接結合すると、結合損失が高くなる。光ファイバのインデックス差は、～０．０１であり、高インデックス差導波路のインデックス差より小さく、正方形チャネル型導波路構造においては典型的には０．３以上であるので、光ファイバ側のモードは、高インデックス差導波路のモードより多くなる。チャネル型導波路は、コアと称される中心部がクラッドと称される周辺部で囲まれている誘電体導波路である。クラッドはコアより小さい屈折率を有する材料（複数を含む）からできている。このような構造では光強

度のピークはコアの方に存在する。高インデックス差導波路は、他の幾何学形状を有する導波路としても規定することが可能であり、リブ型導波路がその一例である。リブ型導波路は、コアがクラッドで囲まれている誘電導波路であるが、クラッド構成材料の少なくとも一部はコアと同じ屈折率を有する材料である。チャネル型導波路とは相異なる導波路構成では、高インデックス差導波路は、高インデックス差チャネル型導波路と同様な（断面積５０％差内で）モードーフィールドサイズを有するものとして定義される。これらの導波路では、クラッドは、光モードのエバネッセント・フィールドが存在する領域として定義される。

【０００５】

更に、光ファイバ導波路のコアインデックスが高インデックス差プレーナ型導波路のものより低い場合は、両導波路間にモード速度差が生じる。モード性質のこのような変化が急激に起こると、高いパワーロスが生じる。

【０００６】

相異なるインデックス差を有する２本の導波路の間のモード結合を効率的に行うアプローチはこれまで幾つかあった。例えば、高インデックス差導波路の寸法を先細にする方法、すなわち、テーパ法によるモード変成が一例である。テーパ法によるモード変成は多くの刊行物に記載されている。高インデックス差導波路のテーパ領域にわたって、導波路コアの厚さまたは幅を、通常の導波領域から厚さまたは幅が小さくなるように、つまり先細になるようにテーパ加工する。高インデックス差導波路の通常の導波領域からテーパ領域にモードが伝送されるにつれて、モードが利用できるコア材料は徐々に少なくなる。コア材の外側に存在するモードフィールド分散の部分が増加し、モードサイズを変える。モードが利用できる導波路インデックスが、テーパの存在によって有効に変えられる。換言すれば、「実効インデックス」がテーパによって徐々に変えられるのである。低インデックス差導波路から高インデックス差導波路へと実効インデックスを徐々に変化させることによって、パワーロスを高めずに２本の導波路間のモード結合を達成することができる。実効インデックスを測定する方法は、グプタ（Ｍ．Ｇuputa）著「光工学便覧」（”Ｔhe Ｈandbook of Ｐhotonics”，Ｂoca Ｒaton，Ｆla．ＣＲＣ Ｐress，５３２－５３５（１９９６））に記載されている。

【０００７】

テーパ法に基づくモード変成については、ブレナ（Ｂrenner）らが電気・電子技術者協会発行の光工学技報に発表した論文（ＩＥＥＥ Ｐhotonics Ｔechnology Ｌetters，Ｖol．５，Ｎo．９，Ｓeptember １９９３）に記載されている。この刊行物では、平面導波路のコアは通常の導波路のコアサイズから垂直方向側が先細にテーパ加工されている。テーパ領域に伝搬するモードのサイズは、実効インデックスが小さくなるので減少し、従って実効インデックス差が減少する。この刊行物が示しているのは、テーパの存在に起因する１本の導波路に徐々に生じるモード変成である。

【０００８】

ステグミューラ（Ｓtegmueller）らの米国特許第５，１９９，０９２号に示されるのは、一つは広く、他は狭い２本の相異なる導波路の間のモード結合である。これら２本の導波路は互いに平行に延び、相互に重ね合わされ、重なり合った導波路から構成される導波案内路を形成する。重なり合った導波路から構成される導波案内路を形成する際に、２本の導波路の片方を、垂直方向側でテーパ状にし、他方の導波路は前と同じ寸法のままとする。テーパ状にさせられた導波路の役割は、実効インデックスの変化を徐々に行わせ、従ってモード変成を、ブレナ（Ｂrenner）らの著作を含む定期刊行物に記載の場合と同じように、行わせることである。相違は、狭い導波路を広い導波路に重ね合わせることであって、一旦狭い方の導波路が垂直側テーパで末端に至ると、広い方の導波路に光波を導くようになる。広い方の導波路は、光波を導く部分全長にわたって狭い方の導波路の周囲を囲むようになっている。一旦モード変成が完了すれば、広い方の導波路が存在することにより、モード導波が支援される。

【０００９】
上記の単一テーパ装置に加えて、テーパを二重に備えているものが、２本の相異なる導波路の間のモード変成に用いられる。ゼンゲルレ（Ｚｅｎｇｅｒｌｅ）らが電気・電子技術者協会発行の光工学技報に発表した論文（ＩＥＥＥ Ｐｈｏｔｏｎｉｃｓ Ｔｅｃｈｎｏｌｏｇｙ Ｌｅｔｔｅｒｓ，Ｖｏｌ．７，Ｎｏ．５，Ｍａｙ １９９５）には、２本のチャネル型導波路の各々をテーパ状に加工し、導波路の一本を他の一本の導波路の上に載せて結合したモード変成器が報告されている。シュワンダ（Ｓｃｈｗａｎｄｅｒ）らが電子工学技報に発表した論文（Ｅｌｅｃｔｒｏｎｉｃｓ Ｌｅｔｔｅｒｓ，Ｖｏｌ．２９，Ｎｏ．４，Ｆｅｂｒｕａｒｙ １９９３）には、２本のリブ型導波路の各々をテーパ状に加工し、導波路の一本の一部を他の一本の導波路の中に埋め込んだモード変成器が報告されている。この技術に用いられたリブ型導波路は２本とも導波性が弱いので、高インデックス差導波路に接続してモード変成を行うのには好適な方法ではない。メルマン（Ｍｏｅｒｍａｎ）らの論文（ＩＥＥＥ Ｊｏｕｒｎａｌ ｏｆ Ｓｅｌｅｃｔｅｄ Ｔｏｐｉｃｓ ｉｎ Ｑｕａｎｔｕｍ Ｅｌｅｃｔｒｏｎｉｃｓ，Ｖｏｌ．３，Ｎｏ．６，Ｄｅｃｅｍｂｅｒ１９９７）には、モード変成に用いられるこれら２重テーパ法が報告されている。

【００１０】
しかし、低インデックス差導波路と高インデックス差導波路との間の効率的なモード変成器については、従来技術では何も報告されていない。本発明は、高インデックス差導波路に接続されるモードを変成するのに有用な埋込型二重テーパに基づく効率的なモード変成器を、初めて、開示するものである。

【００１１】
（発明の開示）
本発明に基づけば、埋込型二重テーパを用いることにより、１本は他に較べて遙かに高いインデックス差を有する２本の導波路の間を低損失でモード結合する光路モード変成器が提供される。本発明に係わる変成器は、光ファイバから送られる光路モードを高インデックス差平面導波路のモードに結合するのに用いることができる。なお、シングルモード光ファイバの典型的なコア寸法は直径約１０μｍであり、シングルモード高インデックス差平面導波路のコア寸法は、チャネル型導波路では典型的に直径１μｍ以下である。１μｍ寸法のシングルモードに対応する正方形チャネル型導波路のインデックス差は、～０．３である。

【００１２】
本発明の目的は、相異なるモードサイズとインデックスとを備える２本の導波路の間でモードを変成する装置を提供することである。本発明の他のもう一つの目的は、光ファイバ導波路のモードと高インデックス差プレーナ型導波路のモードとの間を低パワー損失で結合することが可能な装置を提供することである。

【００１３】
本発明では、低インデックス差導波路と高インデックス差導波路との間でモードがこうむるパワー損失は、光路が二重テーパ結合領域を通るので低くなる。テーパを二重に用いることにより、モード性質の徐々の変化が得られるが、この徐々の変化こそ低損失、双方向モード変成に必要なことである。低インデックス差導波路と高インデックス差導波路双方の導波路は、先端がテーパ状になっており、その方向は反対である。これらの相対する方向に延びるテーパは、２本の導波路が重なり合って、小さな方の導波路が大きな方の導波路に埋め込まれるような構造で配置されている。

【００１４】
本発明の目的は、上記の二重テーパ構造を用いると、２本の導波路の間のモード変成効率が向上することを示すことである。本発明の別の目的の一つは、テーパ加工された導波路は、低損失のモード変成とするには、重ね合わせなければならないこと、すなわち、厳密にいえば、重ね合わさる長さの範囲がゼロ以上としなければならないことを示すことである。

【００１５】

本発明に開示の埋込型二重テーパ技術は、高インデックス差導波路に接続して高効率のモード変成を行うのに好適である。このことは、従来技術の技法では可能でなかったのである。従来技法は低インデックス差のリブ型導波路構成に限定されていたのである。

【００１６】

光ファイバと高インデックス差導波路との間のモード結合に本発明を適用するには、低インデックス差導波路を選択して、これは光ファイバと同様なインデックス差、コアインデックス、およびモードサイズを有するようにする。光ファイバからのモードは最初、同じような性質を有する前記低インデックス差導波路に結合される。つまり、この結合が低損失で達成されるのは、モードに類似性があるからである。結合されると、光は前記低インデックス差導波路に導かれる。次に、前記低インデックス差導波路のモードと実効インデックスとが、上記の二重テーパの効果によって最終導波路のものに徐々に変化される。

【００１７】

（発明を実施するための最良の形態）

図１～図４は、本発明に基づくモード変成器１００の実施の形態の例の概略図である。図１は、モード変成器１００の上面図を示す。一方、図２は同じ変成器の側面図を示す。図３と図４とは、図１に示されるモード変成器の、それぞれ、左側と右側とから見た前面図を示す。

【００１８】

モード変成器１００は、低インデックス差導波路のコア１０２と、高インデックス差導波路のコア１０４と、両コアを包むクラッド１０６とを備え、大きなモードを形成する低インデックス差導波路と、小さなモードを形成する高インデックス差導波路とに接続されるように規定されている。高インデックス差導波路と低インデックス差導波路とは双方ともこの実施の形態ではチャネル型導波路である。

【００１９】

長さL_1のテーパ領域１０８が低インデックス差導波路に設けられている。長さL_2のテーパ領域１１０が高インデックス差導波路に設けられている。テーパ領域１０８，１１０の各々の構成は、テーパ領域１１０の一部１１２、長さL_3の部分がテーパ領域１０８の中に埋め込まれるように重なった状態である。

【００２０】

コア１０４のインデックスであるn_2は、コア１０２とクラッド１０６のインデックスであるn_1とn_3とより大きい。実施の形態の図示の例では、n_1は、n_3より僅かに大きい。低インデックス差導波路は、図３に示されるようにコア１０２とクラッド１０６とで規定される。n_1は、n_3より僅かに大きいだけで、$0 < (n_1 - n_3) / n_3 < 0.1$だからである。他方、高インデックス差導波路は、図４に示されるようにコア１０４とクラッド１０６とで規定される。n_2は、n_3より遙かに大きく、$0.3 \leqq (n_2 - n_3) / n_3$だからである。

【００２１】

ファイバ・モードは、断面寸法が図３に示されるものと同様なので、モード変成器をファイバと高インデックス差導波路と結合するのに使用するとき、図１と図２に示されるようにモード変成器１００の左側に結合される。

【００２２】

操作の際には、図１に示されるようにモード変成器１００の左側から右側に伝わるモードは、コア／クラッドのインデックス比がn_1 / n_3である低インデックス差導波路のモードからコア／クラッドのインデックス比がn_2 / n_3である高インデックス差導波路のモードへと変成される。

【００２３】

図１の左側でモード変成器に入るモードは、図３に示される導波路断面によって決定される。光モードは、低インデックス差導波路によって導かれ、図１に示されるように高インデックスコア１０４のテーパ部１０８に導入されるまでは、モード性質を維持する。テーパ１０８では、コア１０４の水平側がテーパ状となっており、低インデックス差導波路の

導波路モードのインデックスから実効インデックスまで徐々に変化する。コア１０４がテーパ１０８で狭いとき、実効インデックスはコア１０２（およびクラッド１０６）のインデックスに近くなる。従ってモード性質も同じようになる。コア１０４が徐々に広がると、実効インデックスもそれに応じて増加し、高インデックス差導波路のインデックスに接近する。モードは、実効インデックスが変化することにより、図４に示された導波路断面で定められるモードに徐々に変成される。

コア１０２のテーパ方向は、図１に示される通り、コア１０４とは反対方向である。このテーパによって、一旦モードが高インデックス差導波路に結合されてしまうと、低インデックス差導波路は終わりとなる。このテーパにより、また、モードの集束と反射が最適化されることによってモード変成の効率が向上する。

【００２４】

高インデックス差導波路と低インデックス差導波路とにそれぞれ設けられたテーパ領域１０８と１１０とにより、効率的、かつ双方向モード変成器が提供される。一旦モードが低インデックス差導波路に結合されてしまうと、高インデックス差導波路に設けられたテーパの個所で、高インデックス差導波路は終わりとなり、また、低インデックス差導波路に設けられたテーパの個所についても、同様であるからである。モード変成器１００は、図１と図２に示されるように、モードが左側から右側へは勿論のこと右側から左側へ伝送する場合にも作動するので、双方向性モード変成器ともなる。

【００２５】

高インデックスコアのテーパ長さの設計は、モード変成によるパワー損失を最小限に抑えるように行われなければならない。低インデックスコアに設けられるテーパの設計は、反射を最小限に抑え、集束を最大限にし、効率を最大限にするように行われなければならない。テーパ領域１０８と１１０の重なり相部分１１２の選択も、結合効率を最大限にするように行わなければならない。

【００２６】

本発明に係わるモード変成器は光ファイバから高インデックス差導波路にモードを結合するのに有用である。ファイバ・モードは、図１に示されるように変成器の左側に結合することができる。この変成器の断面の様子は図３に示されている。コア１０２とクラッド１０６との間のインデックス差の選択は、ファイバの場合の差と同様な値（～０．０１）として行うことができる。上記コア／クラッドのインデックス比、それにモードは、ファイバと同様であるので、高効率の結合が達成される。結合された後、モードは、上記のように高インデックス差導波路側のモードに変成される。

【００２７】

この結合技術はどのような高インデックス差導波路システムにも適用できる。例えば、クラッド材としてはSiO_2を、低インデックス差導波路のコア材としてはＳｉＯＮを、そして高インデックス差導波路のコア材としてはSi_3N_4を用いることができる。図示の実施の形態の例に対して、設計パラメータとしてL_1＝L_2＝５０μｍおよびL_3＝４０μｍを用いてシミュレーションを行ったところ、波長１．５５μｍのところで効率７５％という値が得られた。これは、従来の突き合わせ結合を行っただけで本発明の二重テーパ法を行わなかった場合に得られた効率３０％に比較して大きな改良である。本発明は双方向性変成器であり、両方向のモード変成に対し同じような効率を示す。

【００２８】

本発明の実施の形態の例は、連続型またはリニア（フラットエッジ）型テーパに関して示されたが、一方、セグメント型またはノンリニア型テーパも本発明に基づいて用いることが可能であることが理解されるであろう。例えば、本発明のテーパとしては、段差が付いたテーパエッジ、あるいは凹形状または凸形状のテーパエッジでも差し支えない。

【００２９】

図５Ａは、図３と図４とに示される導波路の断面図である。図５Ｂ～５Ｆは、図５の矢印線に沿って生じる可能なインデックス分布を幾つか示す。本発明の実施の形態の例は、図５Ａと図５Ｂに示されるように、低インデックス差導波路および高インデックス差導波路

に用いられるコアとクラッドの間にステップ（ｓｔｅｐ）型インデックス分布があるものに関して示されたが、一方、コアとクラッドの間に他の型のインデックス分布があるものも、本発明に基づいて用いることが可能であることが理解されるであろう。

【００３０】

例えば、グレーデッド（ｇｒａｄｅｄ）型インデックス分布やステップ・グレーデッド型インデックス分布のような多岐にわたるインデックス分布も、コアの屈折率がクラッドの屈折率より平均として高い限りは、これを用いることができる。このような分布は図５Ｃ～図５Ｆに示されている。図５Ｂ～図５Ｆの多様なインデックス分布は、説明目的に水平方向に沿うように図示されているが、他の方向についても適用し得る。

【００３１】

本発明の実施の形態の例は、２番目のテーパが１番目のテーパに埋め込まれているものに関して示されたが、一方、２本のテーパの先端が接触しているだけのものも、すなわち、テーパ部分の重なり合いがゼロのものも、本発明に基づいて用いることが可能であることが理解されるであろう。２本のテーパの先端が接触していると考えられるものの二重テーパの例は、図６に示される。２本のテーパ１０８と１１０の各先端の間の距離、すなわち、図６にＤとして示される距離が十分に短かく、有意な伝送効率が得られないときには、２本のテーパの先端が接触しているだけと考えられ、先端があたかも物理的に離れているかのように、重なり合い部分はゼロであるとされねばならない。有意な伝送効率としては、０．１％以上の効率として定義される。

【００３２】

以上、本発明の実施の形態の例について、２本のチャネル型導波路に関して示したが、一方、他の形の導波路構成のものも、断面積の個所のモードーフィールドサイズがこの実施の形態に使われたチャネル型導波路のものと同様である限り、本発明に基づいて用いることが可能であることが理解されるであろう。

【００３３】

本発明は幾つかの好ましい実施の形態に関して記載し、図示したものであるが、それらの形態や詳細に関して多様な変更、削除、付加を行うことも、本発明の精神と範囲に逸脱することなく、可能である。

【図面の簡単な説明】

【図１】本発明に基づくモード変成器の実施の形態の例の概略上面図である。

【図２】図１に示されるモード変成器の側面図である。

【図３】図１に示されるモード変成器の左側から見た前面図である。

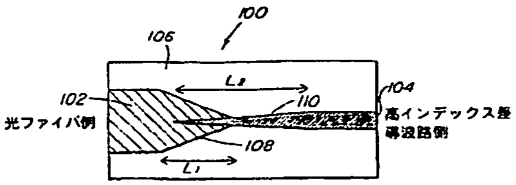
【図４】図１に示されるモード変成器の右側から見た前面図である。

【図５Ａ】図３と図４の導波路の断面図である。

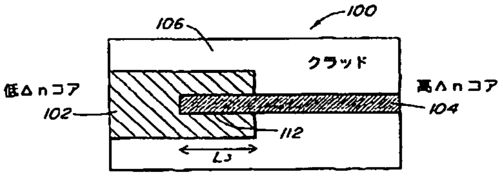
【図５Ｂ～５Ｆ】図５の矢印線に沿って生じる可能なインデックス分布を幾つか示す図である。

【図６】Ｄなる距離が十分短く、０．１％以上の光伝送が得られないとき、テーパの先端が接触しているだけと考えられる二重テーパ具備モード変成器の上面図である。

【図１】


100
106
L2
102
光ファイバ側
110
104
高インデックス差
導波路側
108
L1

【図２】


106
100
クラッド
低Δnコア
102
高Δnコア
104
112
L3

【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau

(43) International Publication Date
17 January 2002 (17.01.2002)

PCT

(10) International Publication Number
WO 02/05000 A2

(51) International Patent Classification⁷: G02B 6/00

(21) International Application Number: PCT/US01/41142

(22) International Filing Date: 26 June 2001 (26.06.2001)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data:

60/217,168	10 July 2000 (10.07.2000)	US
09/841,464	24 April 2001 (24.04.2001)	US

(71) Applicant: MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY [US/US]; 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139 (US).

(72) Inventors: LEE, Kevin, K.; 143 3rd Street #3, Cambridge, MA 02141 (US). WADA, Kazumi; 23 Hill Street, Lexington, MA 02421 (US). LIM, Desmond; 218 Thorndike Street #10h, Cambridge, MA 02141 (US). KIMERLING, Lionel, C.; 369 Strawberry Hill Road, Concord, MA 01742 (US).

(74) Agents: CONNORS, Matthew, E. et al.; Samuels, Gauthier & Stevens, LLP, Suite 3300, 225 Franklin Street, Boston, MA 02110 (US).

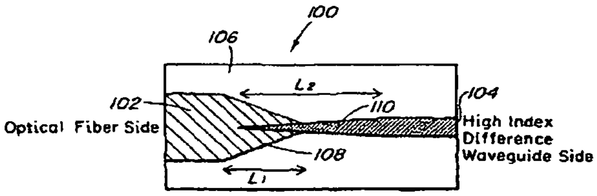
(81) Designated States *(national)*: CA, JP, KR.

(84) Designated States *(regional)*: European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

Published:
- *without international search report and to be republished upon receipt of that report*

For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: MODE TRANSFORMER BETWEEN LOW INDEX DIFFERENCE WAVEGUIDE AND HIGH INDEX DIFFERENCE WAVEGUIDE



(57) Abstract: A mode transformer that enables low-loss coupling between optical modes of two waveguides with different index difference. The mode size and the effective index are gradually changed between two waveguides to gradually transform the mode shape, size, and speed with minimum power loss. The mode transformer is useful for coupling the mode of an optical fiber waveguide with low index difference to the mode of a planar high index difference waveguide, and vice versa.

WO 02/05000 A2

MODE TRANSFORMER BETWEEN LOW INDEX DIFFERENCE WAVEGUIDE AND HIGH INDEX DIFFERENCE WAVEGUIDE

PRIORITY INFORMATION

This application claims priority from provisional application Ser. No. 60/217,168 filed July 10, 2000, and is a continuation-in-part of Ser. No. 09/841,464 filed April 24, 2001.

BACKGROUND OF THE INVENTION

1. Field of the Invention

The present invention is in the field of optics, specifically in optical transformers or transformers for bi-directionally coupling optical radiation between two waveguides. It is also in the field of mode transformers between two waveguides.

2. Prior Art

A mode transformer between two different waveguides is an essential part of an optical system where the lightwave (mode) from one optical component is coupled into another component. In optical communication, a mode transformer between an optical fiber waveguide and a high index difference (difference in the refractive indices of core and cladding) planar waveguide is crucial for successful implementation of planar lightwave circuits (PLC) in fiber communication. Therefore, developing an efficient mode transformer between two waveguides has been a subject of intense research.

When transforming the modes between two waveguides with different index (refractive index) differences and/or core indices, high coupling loss arises due to the difference in the mode size, shape, and mode velocity. For example, the index difference and the mode of a fiber optic waveguide are different from those of a high index difference planar waveguide, resulting in a high coupling loss when the fiber optic waveguide and the high index difference planar waveguide are coupled directly. The index difference of a fiber, which is ~0.01, is smaller than that of high index difference waveguides, which is typically equal to or larger than 0.3 in a square channel waveguide configuration, making the fiber mode larger than the high index difference waveguide mode. A channel waveguide is a dielectric waveguide whose core is surrounded by a cladding that is composed of a material or materials with refractive indices lower than that of the core, and wherein the peak optical intensity resides in the core. High index difference waveguides can be defined in other waveguide geometries including a rib waveguide. A rib waveguide is a dielectric waveguide whose core is surrounded by a cladding that is composed of materials of which at least one has the same refractive index as that of the core. In waveguide configurations that are difference from a channel waveguide, a high index difference waveguide is defined as one that has a mode-field size similar to that of a high index difference channel waveguide (within 50 % difference in cross-sectional area). In these waveguides, cladding is defined as a region where the evanescent field of optical modes exists.

In addition, the core index of the fiber optic waveguide is lower than that of the high index difference planar waveguide causing a mode velocity difference between two waveguides. When such a change in mode properties takes place too quickly, high power loss arises.

There have been several approaches to achieve efficient mode coupling between two waveguides with different index difference, including mode transformation by tapering the dimension of high index difference waveguide. Mode transformation by a taper has been shown in various publications. Over the tapering region of the high index difference waveguide, the thickness or the width of the waveguide core is gradually tapered down from that of the normal guiding region to a lower thickness or width. As the mode travels from the normal guiding region of the high index difference waveguide into the tapering region, the mode experiences decreasing amount of the core material. The fraction of the mode field distribution that exists outside the core material increases, changing the mode size. The index of the waveguide that the mode experiences is effectively changed by the presence of the taper. In other words, the "effective index" is gradually changed by the taper. By gradually changing the effective index from that of the low index difference waveguide to that of the high index difference waveguide, the mode coupling can be achieved between two waveguides without high loss. The method to determine the effective index is described in "*The Handbook of Photonics*", Boca Raton, Fla. CRC Press, 532-535 (1996) by M. Gupta.

Mode transformation based on tapering is shown in the prior art including IEEE

Photonics Technology Letters, Vol. 5, No.9, September 1993 by Brenner et al. In this publication, the core of the planar waveguide is vertically tapered down from that of the regular waveguide. The mode size propagating in the tapered region increases due to the reduction of the effective index, and thus the reduction of the effective index difference. This publication shows the gradual mode transformation occurring in one waveguide due to the presence of a taper.

U.S. Pat. No. 5,199,092, issued to Stegmueller et al. shows the coupling of modes between two different waveguides: one broad and one narrow. The two waveguides run parallel to one another and are superimposed with each other to provide a superimposing waveguide guidance. During the superimposed waveguide guidance, one of the two waveguides is tapered down in vertical dimension, while the other waveguide dimension is kept constant. The role of the tapered waveguide is to provide a gradual effective index change, and thus mode transformation, same as the cases in journal publications including that by Brenner et al. The difference is the superimposition of the narrow waveguide in the broad waveguide, providing waveguiding in the broad waveguide once the narrow waveguide is completely terminated by the vertical taper. The broad waveguide is surrounding the narrow waveguide over the whole waveguiding distance. The presence of the broad waveguide helps guiding the mode once the mode transformation is complete.

In addition to single taper devices described above, dual tapers are used in mode transformation between two different waveguides. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 7, No. 5, May 1995 by Zengerle et al., reports a mode transformer having two channel waveguides, each with a taper, one sitting on top of the other. Electronics Letters, Vol 29, No. 4, February 1993 by Schwander et al., reports a mode transformer having two rib waveguides, each with a taper, a portion of one embedded within the other. Both of the rib waveguides used in this art are weakly guiding and thus it is not a suitable method for mode transformation to or from a high index difference waveguide. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol 3, No 6, December 1997 by Moerman et al. summarizes these dual taper methods for mode transformation.

None of the prior art reports an efficient mode transformer between a low index difference and a high index difference waveguide. This invention discloses, for the first time, an efficient mode transformer based on an embedded dual-taper, useful for transforming the mode to and from a high index difference waveguide.

SUMMARY OF THE INVENTION

In accordance with the invention, there is provided an optical mode transformer using an embedded dual-taper, to achieve low-loss mode coupling between two waveguides, one of them having much higher index difference than the other. The transformer can be used to couple an optical mode from an optical fiber, whose typical single-mode dimension of the core is approximately 10 μm in diameter, to the mode in a high index difference planar waveguide, whose single-mode dimension of the core is typically equal to or less than 1 μm in a channel waveguide. The index difference of a square channel waveguide corresponding to a 1 μm single-mode dimension is ~0.3.

It is an objective of the invention to provide a device for transforming the mode between two waveguides with different mode sizes and indices. It is another objective of the invention to provide a device to enable low-loss coupling between the optical fiber waveguide mode and the high index difference planar waveguide mode.

In the invention, the mode undergoes a low-loss transformation between a low index difference waveguide and a high index difference waveguide by traveling through the coupling region containing a dual-taper. The dual-taper provides a gradual change in the mode properties necessary for low-loss, bi-directional mode transformation. Both the low index difference and high index difference waveguides are tapered, in opposite directions. These two oppositely running tapers are placed so that there is an overlap of two waveguides, with the smaller waveguide embedded in the larger waveguide.

It is an objective of the invention to show that the dual-taper structure enhances mode transformation efficiency between two waveguides. It is another objective of the invention to demonstrate the two tapered waveguides should be overlapped, with the overlapping length ranging up from 0, for low-loss mode transformation.

The embedded dual-taper technology disclosed in this invention is suitable for an efficient mode transformation to and from a high index difference waveguide. This has not been possible by the technology shown in prior art, which was limited to a low index difference rib waveguide configuration.

To apply the invention for coupling the modes between an optical fiber and a high index difference waveguide, the low index difference waveguide can be chosen to have similar index difference, core index, and mode size as an optical fiber. The mode from the fiber is initially coupled to the low index difference waveguide having similar properties. Therefore the coupling is achieved with low loss due to the similarity of the modes. Once coupled, light is guided in the low index difference waveguide. Then the mode and the effective index of the low index difference waveguide are gradually changed to those of the final waveguide by the dual-taper.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

Figure 1 is a top view of simplified schematic diagram of an exemplary embodiment of a mode transformer in accordance with the invention;

Figure 2 is a side view of the mode transformer shown in Figure 1;

Figure 3 is frontal view from the left side of the mode transformer shown in Figure 1;

Figure 4 is a frontal view from the right side of the mode transformer shown in Figure 1;

Figure 5A is a cross-section view of the waveguide of Figures 3 and 4;

Figures 5B-5F are some possible index profiles along the arrowed line 5 in Figure 5A; and

Figure 6 is a top view of a mode transformer with two tapers whose tips are considered to be in contact, when D is short enough to allow for 0.1 % or higher optical transmission.

DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

Figures 1-4 are simplified schematic diagrams of an exemplary embodiment of a mode transformer 100 in accordance with the invention. Figure 1 shows a top view of the mode transformer 100, while Figure 2 shows a side view of the same transformer. Figures 3 and 4 show frontal views from the left and right side, respectively, of the transformer shown in Figure 1.

The mode transformer includes a core 102 of a low index difference waveguide, a core 104 of a high index difference waveguide, and cladding 106 surrounding both cores to define the low index difference waveguide, which forms a large mode, and high index difference waveguide, which forms a small mode. Both high and low index difference waveguides are channel waveguides in this embodiment.

A tapered region 108 of length L_1 is provided in the low index difference waveguide. A tapered region 110 of length L_2 is provided in the high index difference waveguide. Each of the tapered regions 108, 110 are configured to overlap so that a portion 112, of length L_3, of the tapered region 110 is embedded within the tapered region 108.

The index of the core 104, n_2 is larger than n_1 and n_3, the indices of the core 102 and the cladding 106. In the illustrated exemplary embodiment, n_1 is slightly larger than n_3. The low index difference waveguide is defined by the core 102 and cladding 106 as seen in Figure 3, since n_1 is only slightly larger than n_3: $0 < \frac{n_1 - n_3}{n_3} < 0.1$. On the other hand, the high index difference waveguide is defined by the core 104 and cladding 106 as seen in Figure 4, since n_2 is much larger than n_3: $0.3 \leq \frac{n_2 - n_3}{n_3}$.

The fiber mode, whose cross-sectional dimension is similar to that shown in Figure 3, is coupled to the left side of the mode transformer 100 as shown in Figures 1 and 2 when the mode transformer is used to couple fiber to a high index difference waveguide.

In operation, the mode traveling from left to right in the mode transformer 100 as shown in Figure 1 will be transformed from that of the low index difference waveguide, whose core/cladding indices are n_1/n_3, to that of the high index difference waveguide, whose core/cladding indices are n_2/n_3.

The mode entering the mode transformer on the left side of Figure 1 is determined by the waveguide cross-section shown in Figure 3. The optical mode is guided by the low index difference waveguide, preserving the mode characteristics until the taper 108 in the high index core 104 is introduced, as shown in Figure 1. In taper 108, the core 104 is horizontally tapered to gradually change the effective index from that of the waveguide mode in the low index waveguide. When the core 104 is narrow in taper 108, the effective index is close to that of the core 102 (and the cladding 106), thus the mode properties are similar. As the core 104 is gradually widened, the effective index increases accordingly, approaching that of the high index difference waveguide. The mode gradually transforms into a mode in the waveguide cross-section shown in Figure 4 by the change of the effective index.

The core 102 is tapered in the opposite direction from the core 104, as seen in Figure 1. This taper terminates the low index difference waveguide once the mode is coupled into high index difference waveguide. The taper also enhances the efficiency of mode transformation by optimizing the focusing and reflection of the mode.

The tapered regions 108 and 110 on high index difference and low index difference waveguides provide an efficient, bi-directional mode transformer, since the tapers on the high index difference waveguide terminates the high index difference waveguide once the mode is coupled into low index difference waveguide, and vice versa. The mode transformer 100 works for modes traveling from right to left as well as from left to right as shown in Figures 1 and 2, making it a bi-directional mode transformer.

The taper length of the high index core should be designed to minimize mode transformation loss. The design of the taper in the low index core should be designed to minimize reflection, maximize focusing, and maximize efficiency. The overlap portion 112 of the tapered regions 108, 110, should also be chosen to maximize coupling efficiency.

The mode transformer of the invention is useful for coupling mode from an optical fiber to a high index difference waveguide. The fiber mode can be coupled on left side of the transformer as shown in Figure 1, whose cross-sectional view is shown in Figure 3. The index difference between the core 102 and cladding 106 can be chosen to be similar to that of fiber (~0.01). The core/cladding indices and thus the mode are similar to that of fiber, resulting in a highly efficient coupling. Once coupled, the mode will be transformed into that of a high index difference waveguide as described above.

This coupling technology can be applied to any high index difference waveguide systems. For example, one can use SiO_2 as the cladding, SiON as the low index difference waveguide core, and Si_3N_4 as the high index difference waveguide core. For the illustrated exemplary embodiment, the design parameters of $L_1=L_2=50\mu m$ and $L_3=40\mu m$ gave a simulated values of 75 % efficiency at the wavelength of 1.55μm. This is an improvement over 30% efficiency for the case of butt-coupling without a dual-taper. The invention is a bi-directional transformer, which shows similar efficiencies for mode transformation in both directions.

While exemplary embodiments of the invention have been illustrated with continuous or linear (flat edged) tapers, it will be appreciated that segmented or non-linear tapers can also be utilized in accordance with the invention. For example, the taper can have a stepped taper edge, or a concave or convex shaped taper edge.

Figure 5A is a cross-section view of the waveguide of Figures 3 and 4. Figures 5B-5F are some possible index profiles along the arrowed line 5-5 in Figure 5A. While exemplary embodiments of the invention have been illustrated with step index profiles between the core and the cladding for both low and high index difference waveguides as shown in Figures 5A and 5B, it will be appreciated that other index profiles between the core and the cladding can also be utilized in accordance with the invention.

For example, various other index profiles such as graded index and step graded index profiles can be used as long as the refractive index of the core is higher than the refractive index of the cladding on the average. Such profiles are shown in Figures 5C-5F. The various index profiles in Figures 5B-5F are illustrated along the horizontal direction for purposes of illustration, but can also be applied in other directions.

While exemplary embodiments of the invention have been illustrated with the second taper embedded in the first taper, it will be appreciated that two tapers whose tips are in contact can also be utilized in accordance with the invention, with 0 overlapping taper sections. An example of two tapers whose tips are considered to be in contact is shown in Figure 6. When the distance between the ends of the two tapers 108, 110, shown as D in Figure 6, is short enough to allow for appreciable transmission efficiency, they should be considered to be in contact and have 0 overlapping sections, even though they are physically separated. Appreciable transmission efficiency is defined as the efficiency higher than or equal to 0.1 %.

While exemplary embodiments of the invention have been illustrated with two channel waveguides, it will be appreciated that other waveguide configurations can be used as long as the mode-field sizes in cross-sectional area are similar to those in the channel waveguides used in this embodiment.

Although the present invention has been shown and described with respect to several preferred embodiments thereof, various changes, omissions and additions to the form and detail thereof, may be made therein, without departing from the spirit and scope of the invention.

What is claimed is:

CLAIMS

1. A dielectric waveguide optical mode transformer comprising:

a first dielectric channel waveguide including a first core having a first tapered region and surrounded by a cladding; and

a second dielectric channel waveguide including a second core having a second tapered region and surrounded by said cladding, a portion of said second tapered region being embedded within said first tapered region with an embedded length ranging upwards from 0, wherein the embedded portion of said second tapered region is completely surrounded by said first tapered region in the cross-section transverse to the mode transformation direction, and wherein the embedded length of said second tapered region within said first tapered region is 0 when the tips of said first and second tapered regions are in contact.

2. The transformer of claim 1, wherein said cladding comprises one or more materials with different refractive indices than those of said first and second cores.

3. The transformer of claim 1, wherein the index of refraction of said first core is graded in the transverse direction.

4. The transformer of claim 1, wherein the index of refraction of said second core is graded in the transverse direction.

5. The transformer of claim 1, wherein the index of refraction of said cladding is graded in the transverse direction.

6. The transformer of claim 1, wherein the index of refraction changes gradually from said first core to said cladding in the transverse direction.

7. The transformer of claim 1, wherein the index of refraction changes gradually from said second core to said cladding in the transverse direction.

8. The transformer of claim 1, wherein the index of refraction changes abruptly from said first core to said cladding in the transverse direction.

9. The transformer of claim 1, wherein the index of refraction changes abruptly from said second core to said cladding in the transverse direction.

10. The transformer of claim 1, wherein the tips of said first and second tapered region are in contact if the optical transmission efficiency between said first and said second tapered regions is equal to or above 0.1%.

11. The transformer of claim 1, wherein said first and second cores, and said cladding are integrated on a planar lightwave circuit (PLC).

12. The transformer of claim 1, wherein the index of refraction of said first core is relatively lower than the index of refraction of said second core.

13. The transformer of claim 1, wherein the index of refraction of said first core is slightly higher than the index of refraction of said cladding.

14. The transformer of claim 13, wherein $0<(n_1-n_3)/n_3<0.1$, where n_1 is the refractive index of said first core and n_3 is the refractive index of said cladding.

15. The transformer of claim 1, wherein the index of refraction of said second core is substantially higher than the index of refraction of said first core and said cladding.

16. The transformer of claim 15, wherein $0.3 \quad (n_2-n_3)/n_3$, where n_1 is the refractive index of said first core, n_2 is the refractive index of said second core, and n_3 is the refractive index of said cladding.

17. The transformer of claim 1, wherein a propagating optical mode is transformed in size, shape and speed as it propagates between said first core and said second core.

18. The transformer of claim 1, wherein a propagating optical mode can propagate bi-directionally between said first and second waveguides.

19. The transformer of claim 1, wherein said second tapered region provides an effective index change to a propagating optical mode.

20. The transformer of claim 1, wherein said first tapered region minimizes reflection of a propagating mode and focuses said propagating mode into said second core.

21. The transformer of claim 1, wherein said first tapered region enhances the efficiency of mode transformation of a propagating mode.

22. The transformer of claim 1, wherein said first and second tapered regions are continuous or segmented.

23. The transformer of claim 1, wherein said first and second tapered regions are linear or non-linear.

24. A dielectric waveguide optical mode transformer comprising:

a first dielectric waveguide including a first core having a first tapered region and surrounded by a cladding; and

a second dielectric waveguide including a second core having a second tapered region and surrounded by said cladding, a portion of said second tapered region being embedded within said first tapered region with an embedded length ranging upwards from 0, wherein said second core and said cladding define a high index difference waveguide, and wherein the embedded portion of said second tapered region is completely surrounded by said first tapered region in the cross-section transverse to the mode transformation direction, and wherein the embedded length of said second tapered region within said first tapered region is 0 when the tips of said first and second tapered regions are in contact.

25. The transformer of claim 24, wherein the index of refraction of said first core is relatively lower than the index of refraction of said second core.

26. The transformer of claim 24, wherein a high index difference waveguide is defined as a waveguide whose mode-field size is within 50 % difference in cross-

sectional area from that of a channel waveguide whose index difference is equal to or larger than 0.3.

27. The transformer of claim 24, wherein a propagating optical mode is transformed in size, shape and speed as it propagates between said first core and said second core.

28. The transformer of claim 24, wherein a propagating optical mode can propagate bi-directionally between said first and second waveguides.

29. The transformer of claim 24, wherein said second tapered region provides an effective index change to a propagating optical mode.

30. The transformer of claim 24, wherein said first tapered region minimizes reflection of a propagating mode and focuses said propagating mode into said second core.

31. The transformer of claim 24, wherein said first tapered region enhances the efficiency of mode transformation of a propagating mode.

32. The transformer of claim 24, wherein said first and second tapered regions are continuous or segmented.

33. The transformer of claim 24, wherein said first and second tapered regions are linear or non-linear.

34. The transformer of claim 24, wherein the index of refraction of said first core is graded in the transverse direction.

35. The transformer of claim 24, wherein the index of refraction of said second core is graded in the transverse direction.

36. The transformer of claim 24, wherein the index of refraction of said cladding is graded in the transverse direction.

37. The transformer of claim 24, wherein the index of refraction changes gradually from said first core to said cladding in the transverse direction.

38. The transformer of claim 24, wherein the index of refraction changes gradually from said second core to said cladding in the transverse direction.

39. The transformer of claim 24, wherein the index of refraction changes abruptly from said first core to said cladding in the transverse direction.

40. The transformer of claim 24, wherein the index of refraction changes abruptly from said second core to said cladding in the transverse direction.

41. The transformer of claim 24, wherein the tips of said first and second tapered region are in contact if the optical transmission efficiency between said first and said second tapered regions is equal to or above 0.1%.

42. The transformer of claim 24, wherein said first core, said second core, and said cladding are integrated on planar lightwave circuit (PLC).

43. The transformer of claim 24, wherein said cladding is defined as a region or regions surrounding said first and second cores with lower effective index than those of said first and second cores.

44. The transformer of claim 24, wherein said cladding is defined as a region or regions surrounding said first and second cores where the evanescent field of optical modes exists.

45. An optical mode coupler comprising:

a first core having a first tapered region;

a second core having a second tapered region, a portion of said second tapered region being in embedded within said first tapered region; and a cladding surrounding said first and second cores, said cladding comprising one or more materials with different refractive indices than those of said first and second cores.

46. A dielectric waveguide optical mode transformer comprising:

a first dielectric waveguide including a first core having a first tapered region and surrounded by a cladding; and

a second dielectric waveguide including a second core having a second tapered region and surrounded by said cladding, a portion of said second tapered region being embedded within said first tapered region, wherein said cladding comprising one or more materials with different refractive indices than those of said first and second cores.

47. A method of bi-directionally coupling a propagating optical mode between optical regions comprising:

providing a first core having a first tapered region;

providing a second core having a second tapered region, a portion of said second tapered region being embedded within said first tapered region;

providing a cladding that surrounds said first and second cores, said cladding comprising one or more materials with different refractive indices than those of said first and second cores; and

introducing a propagating optical mode into either said first or second cores.

48. A method of bi-directionally coupling a propagating optical mode between optical regions comprising:

providing a first core having a first tapered region;

providing a second core having a second tapered region, a portion of said second tapered region being embedded within said first tapered region;

providing a cladding that surrounds said first and second cores, said cladding comprising one or more materials with different refractive indices than those of said first and second cores; and introducing a propagating optical mode into either of said optical regions.

49. A method of bi-directionally coupling a propagating optical mode between a high refractive index region and a low refractive index region comprising:

providing a first low index of refraction core having a first tapered region;

providing a second high index of refraction core having a second tapered region, a portion of said second tapered region being embedded within said first tapered region;providing a cladding that surrounds said first and second cores, said cladding comprising one or more materials with different refractive indices than those of said first and second cores; and introducing a propagating optical mode into either said first or second cores.

50. A method of bi-directionally coupling a propagating optical mode between a high refractive index region and a low refractive index region comprising:

providing a first low index of refraction core having a first tapered region;

providing a second high index of refraction core having a second tapered region, a portion of said second tapered region being embedded within said first tapered region;

providing a cladding that surrounds said first and second cores, said cladding comprising one or more materials with different refractive indices than those of said first and second cores; and

introducing a propagating optical mode into either said high refractive index region or said low refractive index region.

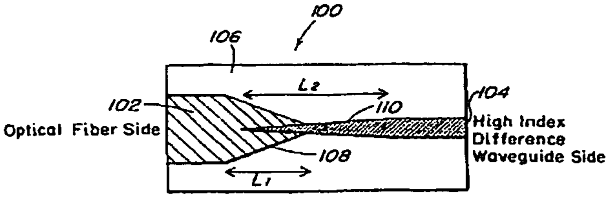


FIG. 1

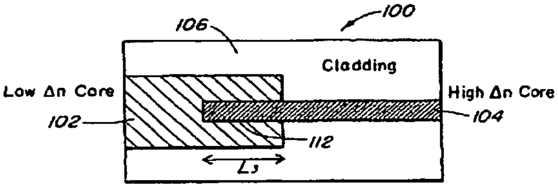


FIG. 2

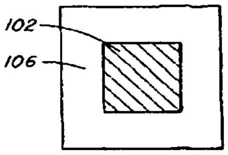


FIG. 3

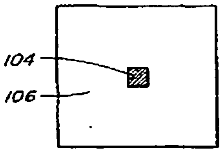


FIG. 4

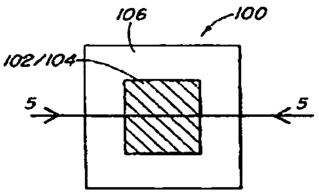


FIG. 5A

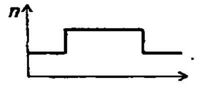


FIG. 5B

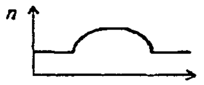


FIG. 5C

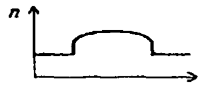


FIG. 5D

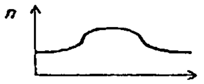


FIG. 5E

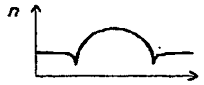


FIG. 5F

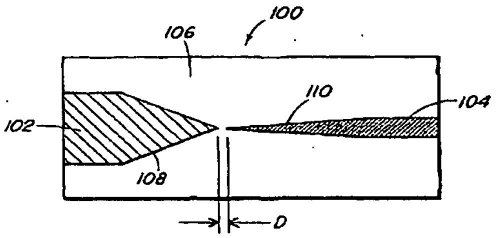


FIG. 6

【国際公開パンフレット（コレクトバージョン）】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau

(43) International Publication Date
17 January 2002 (17.01.2002)

PCT

(10) International Publication Number
WO 02/005000 A3

(51) International Patent Classification⁷: **G02B 6/30**, 6/12

(21) International Application Number: PCT/US01/41142

(22) International Filing Date: 26 June 2001 (26.06.2001)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data:

60/217,168	10 July 2000 (10.07.2000)	US
09/841,464	24 April 2001 (24.04.2001)	US

(71) Applicant: MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY [US/US]; 77 Massachusetts Avenue, Cambridge, MA 02139 (US).

(72) Inventors: LEE, Kevin, K.; 143 3rd Street #3, Cambridge, MA 02141 (US). **WADA, Kazumi**; 23 Hill Street, Lexington, MA 02421 (US). **LIM, Desmond**; 218 Thorndike Street #106, Cambridge, MA 02141 (US). **KIMERLING, Lionel, C.**; 369 Strawberry Hill Road, Concord, MA 01742 (US).

(74) Agents: CONNORS, Matthew, E. et al., Samuels, Gauthier & Stevens, LLP, Suite 3300, 225 Franklin Street, Boston, MA 02110 (US).

(81) Designated States *(national)*: CA, JP, KR.

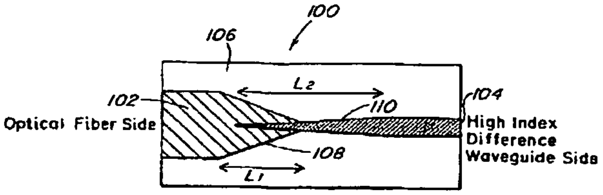
(84) Designated States *(regional)*: European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

Published:
— *with international search report*

(88) Date of publication of the international search report:
6 March 2003

For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

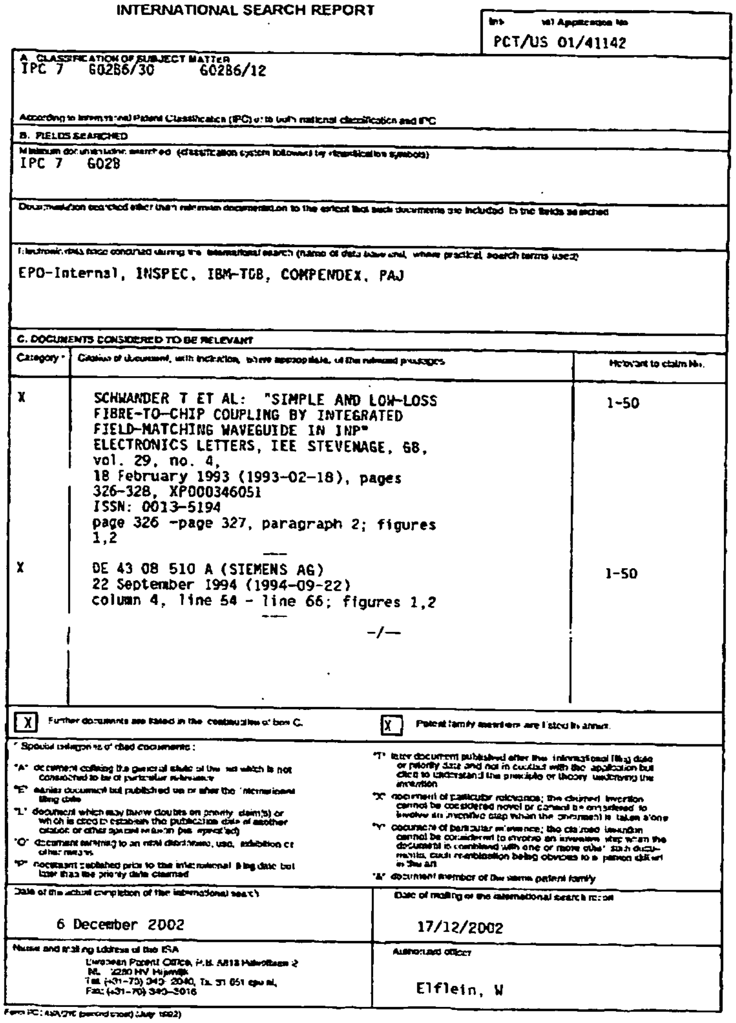
(54) Title: MODE TRANSFORMER BETWEEN LOW INDEX DIFFERENCE WAVEGUIDE AND HIGH INDEX DIFFERENCE WAVEGUIDE



(57) Abstract: A mode transformer (100) that enables low loss coupling between optical modes of two waveguides with different index difference. The mode size and the effective index are gradually changed between two waveguides to gradually transform the mode shape, size, and speed with minimum power loss. The mode transformer is useful for coupling the mode of an optical fiber waveguide with low index difference to the mode of a planar high index difference waveguide, and vice versa.

WO 02/005000 A3

【国際調査報告】



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/US 01/41142

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 G02B6/30 G02B6/12

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 G02B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC, IBM-TDB, COMPENDEX, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	SCHWANDER T ET AL: "SIMPLE AND LOW-LOSS FIBRE-TO-CHIP COUPLING BY INTEGRATED FIELD-MATCHING WAVEGUIDE IN INP" ELECTRONICS LETTERS, IEE STEVENAGE, GB, vol. 29, no. 4, 18 February 1993 (1993-02-18), pages 326-328, XP000346051 ISSN: 0013-5194 page 326 -page 327, paragraph 2; figures 1,2	1-50
X	DE 43 08 510 A (SIEMENS AG) 22 September 1994 (1994-09-22) column 4, line 54 - line 66; figures 1,2	1-50
	-/--	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

° Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 6 December 2002	Date of mailing of the international search report 17/12/2002
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Elflein, W

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Inte ional Application No
PCT/US 01/41142

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category °	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	EP 0 845 690 A (FUJITSU LTD) 3 June 1998 (1998-06-03) column 39, line 22 - line 58; figures 50,51,56A column 41, line 49 -column 42, line 21	1-50
X	SOTTINI S ET AL: "OPTICAL FIBER-POLYMER GUIDE COUPLING BY A TAPERED GRADED INDEX GLASS GUIDE" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, IEEE INC. NEW YORK, US, vol. 31, no. 6, 1 June 1995 (1995-06-01), pages 1123-1130, XP000510144 ISSN: 0018-9197	1-44
A	abstract; figure 1	45-50
A	CHO H S ET AL: "Unbalanced facet output power and large spot size in 1.3 &micro;m tapered active stripe lasers" ELECTRONICS LETTERS, IEE STEVENAGE, GB, vol. 33, no. 9, 24 April 1997 (1997-04-24), pages 781-782, XP006007371 ISSN: 0013-5194 page 781, left-hand column	3-7, 34-38

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No
PCT/US 01/41142

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)		Publication date
DE 4308510	A	22-09-1994	DE	4308510 A1	22-09-1994
EP 0845690	A	03-06-1998	JP	10160976 A	19-06-1998
			EP	0845690 A2	03-06-1998
			US	6112002 A	29-08-2000

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 1992)

フロントページの続き

(72)発明者　リー　ケビン　ケイ
　　アメリカ合衆国　マサチューセッツ　ケンブリッジ　サード　ストリート　１４３　＃３
(72)発明者　ワダ　カズミ
　　アメリカ合衆国　マサチューセッツ　レキシントン　ヒル　ストリート　２３
(72)発明者　リム　デズモンド
　　アメリカ合衆国　マサチューセッツ　ケンブリッジ　ソーンダイク　ストリート　２１８　＃１０６
(72)発明者　キマーリング　ライオネル　シー
　　アメリカ合衆国　マサチューセッツ　コンコード　ストロベリー　ヒル　ロード　３６９
Ｆターム(参考) 2H047 KA04　KA08　KA13　LA23　RA08　TA17